

УДК 621.165.62–192

doi: 10.20998/2078-774X.2018.13.11

*О. С. МОРОЗ***ПРОБЛЕМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО И ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

Представлены результаты исследований формирования и влияния профиля температур на напряженно-деформированное состояние элементов промышленного и энергетического оборудования. В качестве исследуемого элемента котлоагрегатов был выбран патрубок внутри которого протекала вода для охлаждения. Рассмотрено влияние распределения температуры внутри патрубка на его напряженное состояние. В качестве средства расчета была использована универсальная программная система конечно-элементного анализа *ANSYS*.

Ключевые слова: поле температур, патрубков, напряженно-деформированное состояние, зона обратных токов, *ANSYS*.

*О. С. МОРОЗ***ПРОБЛЕМИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ ЕЛЕМЕНТІВ
ЕНЕРГЕТИЧНОГО ТА ПРОМИСЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ**

Представлені результати досліджень формування та впливу профілю температур на напружено-деформований стан елементів промислового та енергетичного обладнання. В якості досліджуваного елемента котлоагрегатів був обраний патрубок всередині якого протікала вода для охолодження. Розглянуто вплив розподілу температури всередині патрубка на його напружений стан. Як засіб розрахунку була використана універсальна програмна система кінцево-елементного аналізу *ANSYS*.

Ключові слова: поле температур, патрубков, напружено-деформований стан, зона зворотних токів, *ANSYS*.

*О. МОРОЗ***PROBLEMS OF THE USABILITY OF HIGH-TEMPERATURE ELEMENTS OF THE ENERGY
AND INDUSTRIAL EQUIPMENT**

The repair rate of the energy and industrial boiler equipment is defined to a great extent by the characteristics of temperature field on the boiler tube surface. Actually, the deviation of gas temperature field from the design profile is always observed for different equipment elements when the available burner devices mainly of a registered type are working. It results in considerable thermal strains in some equipment elements and as a consequence in increased total strain. In some cases the gas temperature field nonuniformity prompts to drop the torch temperature by an increase in the excess air coefficient, decreasing thus the power plant efficiency. This scientific paper gives consideration to formation processes of the temperature field of combustion products along the chamber length and on the surface of the element of boiler equipment that was represented as a branch pipe. It was shown that the temperature profile of combustion products along the branch pipe height specified by equipment operation conditions affects the stress-strain state. It was noted that the air and combustion product mixing process in the space between the stabilizers is characterized by a high intensity due to a high temperature gradient in the trace cross-section. However, a total equalization of the temperature gradient before the branch pipe fails to take place due to a high flow velocity. For the option studied, the highest stress was registered at the end side of branch pipe.

Key words: temperature field, branch pipe, stress-strain state, reverse current zone, and *ANSYS*.

Введение

В энергетике Украины эксплуатируется значительное количество энергетических и промышленных котлов различной мощности, печей, сушил, газотурбинных установок и т.д., отработавших свой срок эксплуатации. Опыт работы таких установок показал, что одной из проблем их дальнейшего функционирования является наличие существенного несоответствия между реальным и расчетным распределением тепловых потоков в топочном пространстве. Это приводит к термическим перекосам в элементах оборудования, возникновения напряжений и в конечном итоге к их аварии. В этих обстоятельствах необходимость проведения работ по определению состояния наиболее термонапряженных элементов, оценка их остаточного ресурса, выдача рекомендаций по своевременному снятию их с эксплуатации или разработка сравнительно экономных мероприятий для продления срока эксплуатации этих агрегатов

[1].

На основе обзора литературных источников и опыта эксплуатации паровых котлов тепловых электростанций доказано, что наиболее существенным фактором, ухудшает надежность и экономичность энергетического оборудования, является неравномерность температуры газов в топочной камере, как в пространстве, так и во времени, что приводит к нарушению температурного и тепло-гидравлические режимов поверхностей нагрева, а также возникновения дополнительных термоциклических нагрузок на металл.

Тепловое состояние труб водопаровой тракта парового котла и парогенератора устанавливается в зависимости от соотношения количества подведенной теплоносителем теплоты к внешней поверхности и отведенной теплоты с рабочей средой от внутренней поверхности. В результате одновременно протекают процессы подвода и отвода теплоты и в каждой точке поверхности нагрева устанавливается свой тепловой состояние, обусловли-

© О. С. Мороз, 2018

вает соответствующий уровень температуры. В совокупности температура поверхности нагрева в разных точках образует свое температурное поле.

В современных мощных паровых котлах основные парообразующие поверхности представляют собой настенные топочные экраны, обогреваемые неравномерно по периметру. Интенсивный обогрев приходится на лобовую образующую, обращенную в топку, наименьший обогрев – обратную к обмуровке. Неравномерное обогрев вызывает поперечную циркуляцию рабочей среды, которая способствует перетеканию его из области участков периметра, которые обогриваются слабо, к участкам тех, что обогриваются интенсивно, в результате чего возникает также распространения теплоты по периметру за счет теплопроводности металла.

Одной из причин аварийной остановки котлов могут служить повреждения труб поверхностей нагрева. По кругу паропровода на горизонтальных участках преимущественно в периоды прогрева вследствие неравномерного теплообмена с греющим паром возникает разница температур между верхом и низом трубы, возрастает при недостаточном дренировании паропровода и в местах возможного скопления конденсата. Возникающие при этом температурные напряжения в толстенных паропроводах могут стать значительными.

Цель работы

Выполнение оценки напряженно-деформированного состояния из-за температурной неравномерности по кругу патрубка на вертикальных участках.

Розрахункове дослідження теплового та напружено-деформованого стану високотемпературного елементу котлоагрегату

Первым этапом расчетных исследований теплового состояния трубопровода котлоагрегата было построение комплексной модели, которая рассматривает цилиндрическую трубу при внешнем обтекании трубопровода горячими газами и протекании в трубопроводе воды.

На этом этапе расчетных исследований теплового состояния трубопровода котлоагрегата была построена модель, которая включает горелочное устройство, созданный тремя стабилизаторами, и цилиндрическую трубу диаметром 36×6 мм и длиной 150 мм. Поток газов, образовывались после горелочного устройства, обтекает цилиндрическую трубу. Горелочное устройство состояло из

трех стабилизаторов шириной $B_{ст} = 15$ мм, которые размещались в канале шириной 150 мм с шагом $t_{ст} = 50$ мм. Коэффициент затенения $K_f = 0,30$. Расстояние от горелочного устройства к цилиндрической трубе равна 110 мм. Для решения граничной задачи нестационарной теплопроводности необходимо задать граничные условия на всех поверхностях теплообмена таким образом, чтобы они соответствовали пусковым характеристикам и эксплуатационному режиму работы котлоагрегата. При задании граничных условий рассматривались водогрейные и энергетические котлы. На участке длиной $X = 110$ мм между горючим устройством и трубопроводом происходит массообмен между горячими газами следа за стабилизатором и холодным воздухом в щели между стабилизаторами. В тыльной части стабилизатора вследствие интенсивного массообмена в зоне рециркуляции температура несколько выравнивается и ее величина находится на уровне 400 °С. Но полного выравнивания не происходит и имеем только некоторое сглаживание профиля температуры.

Во внутренней полости трубопровода протекала холодная вода с температурой $t_w = 20$ °С при перпендикулярном направлению тока воды и горячих газов. Задана большая разница температур между горячими газами и холодной водой позволила апробировать расчетную модель гидродинамики, теплового и напряженно-деформированного состояния трубопровода [2].

Рассчитанное тепловое состояние цилиндрической трубы применяется в программном комплексе *ANSYS* в качестве граничных условий при расчетном исследовании напряженно-деформированного состояния с использованием универсального пакета *StaticStructural*. Распределение интенсивности напряжений по толщине стенки патрубка (рис. 1) свидетельствует о том, что интенсивность упругих напряжений в цилиндрической трубе лежит в диапазоне (357–445) МПа.

Распределение температуры по толщине стенки (рис. 2) указывает на переменный тепловой состояние трубопровода. Температура металла трубопровода находится на уровне (223–143) °С. Максимальная температура металла трубопровода наблюдается на задней поверхности цилиндрической трубы по ходу горячего газа и составляет 224 °С (рис. 2). Также значительный уровень температур фиксируется на передней поверхности по ходу горячего газа напротив центрального стабилизатора горелочного устройства (от 214 °С до 223 °С). Минимальный уровень температур имеет место в нижней части трубопровода (143–152) °С.

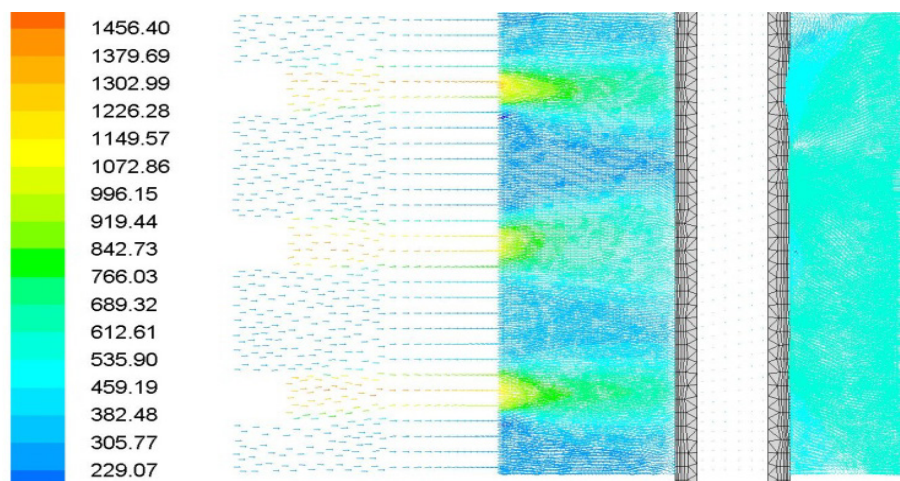


Рис. 1 – Векторы скорости и температура продуктов сгорания и воздуха, которые натекают на патрубок (ANSYS Fluent)

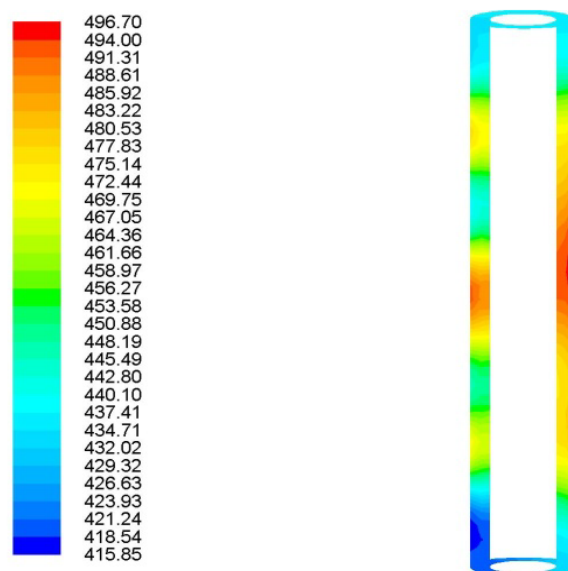


Рис. 2 – Распределение температуры по толщине стенки патрубка (ANSYS Fluent)

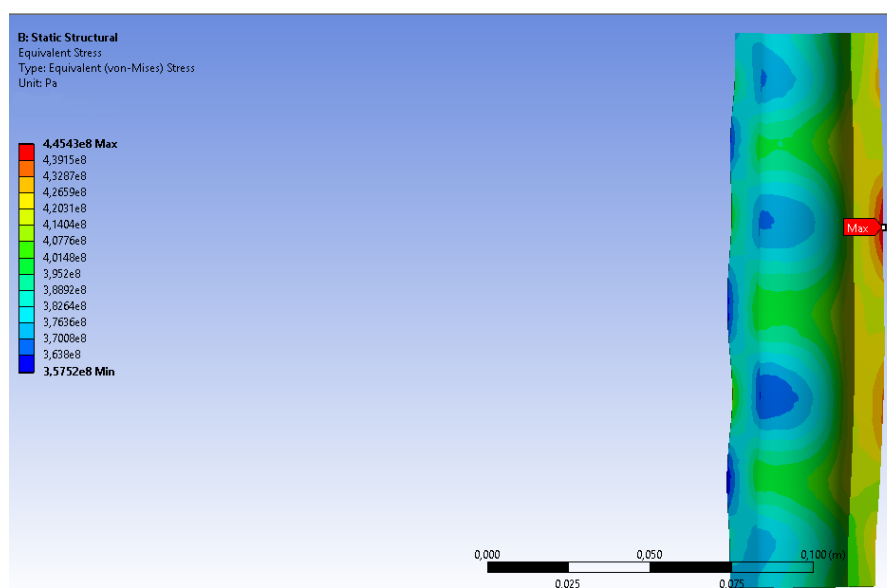


Рис. 3 – Распределение интенсивности напряжений по толщине стенки патрубка

Следующим этапом было реализация поставленной задачи определения напряжений в элементе с использованием универсального пакета *StaticStructural*. Применялась процедура *Equivalent Stress*, которая базируется на критерии фон Мизеса.

Распределение интенсивности напряжений по толщине стенки патрубка (рис. 3) указывает на то, что максимальные напряжения возникают на внешней поверхности цилиндрической трубе, омываемая горячей топливно воздушной смесью. Градиент температур внутренней и наружной поверхности цилиндрической трубе значений и составляет около (150–200) °С. Значительные градиенты температур при эксплуатационных режимах обуславливают высокий уровень условных упругих напряжений и снижения ресурсных характеристик металла цилиндрических патрубков котлоагрегатов [3, 4].

Таким образом, максимальное значение интенсивности напряжений по Мизеса локальное, составляет 445 МПа и отмечается в городе максимальной температуры на задней стенке патрубка (рис. 3). Минимальное значение интенсивности напряжений по Мизеса отмечено на передней поверхности патрубка в месте минимума температуры, также является локальным и составляет 357 МПа.

Такое распределение интенсивности напряжений по Мизеса можно объяснить характером горения топлива вследствие наличия 3-х горелок, неравномерностью прогрева трубы тепловым потоком от них, а также перпендикулярным направлением течения газовой составляющей потока газов на внешней поверхности патрубка, нагревает его, и охлаждающей водяной составляющей на внутренней поверхности патрубка. Максимальное значение интенсивности напряжений по Мизеса на задней стенке патрубка может возникать также за счет турбулизации течения газа по трубе и интенсификации теплообмена в этой зоне [5–7].

Выводы

1. Высокотемпературные элементы энергетического и промышленного оборудования, в первую очередь, трубопроводы различного назначения, расположенных в топочном пространстве и находятся под действием газового потока с высокой температурой, работающих в тяжелых условиях.

2. Из проведенного комплекса расчетных исследований можно сделать вывод, что использо-

вание программного комплекса *ANSYS Fluent* позволяет выполнять анализ процесса течения газов в топочном пространстве при обтекании трубопровода, а также определять характеристики термонапряженного состояния.

Список литературы

1. Кривоногов Б. М. *Повышение эффективности сжигания газа и охрана окружающей среды*. Ленинград: Недра, 1986. 250 с.
2. Протопопов В. С. Теплофизика высоких температур. *Изв. АН СССР*. 1977. Т. 15. № 4. С. 815–821.
3. *Водно-химические режимы и надежность металла энергоблоков мощностью 500 и 800 МВт*. Под общ. ред. В. Е. Дорошука, В. Б. Рубина. Москва: Энергоиздат, 1981.
4. Адамович В. К., Данышевский И. А., Дорофеев Д. Д. Разработка нормативно-технической базы, обеспечивающей повышение расчетного ресурса эксплуатации до 200 тыс. ч. элементов котлов и трубопроводов. *Теплоэнергетика*. 1984. № 10. С. 2–4.
5. *Методические указания по расчету допустимых разностей температур и скоростей прогрева энергетических блоков*. Москва: СПО Союзтехэнерго, 1983.
6. Плоткин Е. Р., Лейзерович А. Ш. *Пусковые режимы паровых турбин энергоблоков*. Москва: Энергия, 1980.
7. Резников М. И. *Паровые котлы ТЭС*. Москва: Энергия, 1978.

References (transliterated)

1. Krivonogov B. M. (1986), *Povyishenie effektivnosti szhiganiya gaza i ohrana okruzhayushey sredy* [Improving the efficiency of gas combustion and protecting the environment], Nedra, Leningrad, 250 p.
2. Protopopov V. S. (1977), "Teplofizika vyisokih temperature [Thermal physics of high temperatures]", *Izd. AN SSSR*, Vol. 15, No. 4, pp. 815–821.
3. (1981), *Vodno-himicheskie rezhimy i nadezhnost metalla energoblokov moschnostyu 500 i 800 MVt* [Water-chemical regimes and reliability of metal power units with a capacity of 500 and 800 MW], V. E. Doroshuka, V. B. Rubina (Ed.), Energoizdat, Moscow.
4. Adamovich V. K., Danyushevskiy I. A., Dorofeev D. D. (1984), "Razrabotka normativno-tehnicheskoy bazyi, obespechivayushey povyishenie raschetnogo resursa ekspluatatsii do 200 tyis. ch. elementov kotlov i truboprovodov [Development of the regulatory and technical base that provides an increase in the estimated service life of up to 200 thousand parts of boilers and pipelines]", *Teploenergetika*, No. 10, pp. 2–4.
5. (1983), *Metodicheskie ukazaniya po raschetu dopustimiyh raznostey temperatur i skorostey progreva energeticheskikh blokov* [Methodical instructions for calculating the permissible differences in temperatures and rates of heating up of power units], SPO Soyuztehenergo, Moscow.
6. Plotkin E. R., Leyzerovich A. Sh. (1980), *Puskovyye rezhimy parovyih turbin energoblokov* [Starting conditions of steam turbines of power units], Energiya, Moscow.
7. Reznikov M. I. (1978), *Parovyye kotlyi TES* [Steam boilers of TPP], Energiya, Moscow.

Поступила (received) 00.00.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Мороз Олег Сергійович (Мороз Олег Сергеевич, Moroz Oleh) – магістрант; Національний технічний університет України «Київський Політехнічний Інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна; тел.: (067) 451–15–70; e-mail: morozoleg95@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1427-8068>.